



Memoria del proyecto para optar al Título
de Ingeniera Civil Oceánica

EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL OLEAJE Y VIENTO OPERACIONAL QUE SE PRESENTA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Alexandra Antonia Bruna Torres

Enero 2023

APROBACIÓN

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL OLEAJE Y VIENTO OPERACIONAL QUE SE PRESENTA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO

Alexandra Antonia Bruna Torres

Comisión Revisora	Nota	Firma
Sergio Bidart Revisor	_____	_____
Mauricio Reyes Revisor	_____	_____
Patricio Winckler Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniera Civil Oceánica, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Un año intenso y satisfactorio, donde culmina el primero de muchos desafíos. Quiero agradecer a Felipe Berrios y José Aldunate de EPSA por proporcionarme la información necesaria y la idea del proyecto, a Carlos Bidart por introducirme al tema de practicaje, a Javiera Mora por enseñarme de un principio la metodología para obtener proyecciones y por siempre brindarme su ayuda, a Cesar Esparza por compartir resultados de su trabajo para clima de oleaje, a Pablo Córdova por brindarme las herramientas necesarias en la programación y unas interesantes conversaciones. Agradecer también al profesor Mauricio Reyes que a pesar de exigirme en el trabajo se daba el tiempo de escuchar mi día a día. Al profesor Patricio Winckler agradecida de guiarme en este estudio, buscando todas las maneras de que me quedara el aprendizaje y que me siguiera motivando en el tema.

En este apartado también quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de este proceso universitario. Mis padres, pilares fundamentales, agradecida de su apoyo ante cualquier adversidad y por darme las herramientas y la libertad de crecer como persona, a mi hermana por ser esa compañera que siempre está para mí, a mis bebés Emi y Bambi, mi todo. A mis tatas, que siempre han estado en todas conmigo, y aunque les repita mil veces que seguía estudiando ahora les puedo decir, sí, ya terminé la Universidad.

También agradecida de los grandes amigos que me ha dado la universidad, los que me han apoyado desde un principio y siguen demostrando su alegría de que este finalizando esta etapa. A mi amigo Matías que ha estado desde el primer día que vendíamos choripanes en el Roma hasta ahora donde discutimos sobre nuestros curriculums, a mi amigo Michel que me ha motivado y me ha tirado siempre flores, a la Monse y a la Cami que siempre son las primeras en estar. En fin, no terminaría nunca, agradecida de todos mis compañeros por esas noches de estudio tanto presencial como virtual que terminaban con buenas conversaciones. Agradecida de mi amigo Hugo que fue fundamental este año, el cual me distrajo de que no cayera en el estrés del tiempo. Gracias por esta maravillosa etapa. Piquitos al cielo.

CONTENIDOS

RESUMEN.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS.....	2
3 MARCO TEÓRICO	3
3.1 CAMBIO CLIMÁTICO	3
3.1.1 ESCENARIOS DE MODELACIÓN	4
3.1.2 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM)	6
3.2 VARIABLES DE ESTUDIO	8
3.2.1 OLEAJE	8
3.2.2 VIENTO.....	10
3.3 PUERTO DE SAN ANTONIO	11
3.3.1 ZONA DE ESPERA DE PRÁCTICOS	12
3.3.2 RESTRICCIONES OPERACIONALES.....	13
4 METODOLOGÍA	16
4.1 ESTUDIO DE VIENTOS	16
4.1.1 BASES DE DATOS DE VIENTOS	16
4.1.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO.....	20
4.2 ESTUDIO DE OLEAJE	20
4.2.1 BASES DE DATOS DE OLEAJE	20
4.2.2 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR OLEAJE	21
5 RESULTADOS	23
5.1 ESTUDIO DE VIENTO	23
5.1.1 SELECCIÓN DE MODELOS GCM.....	23
5.1.2 PROYECCIONES A ESCALA OCEÁNICA.....	24
5.1.3 PROYECCIONES EN EL PUERTO SAN ANTONIO.....	27
5.1.4 ANÁLISIS DE DOWNTIME POR VIENTO.....	31
5.2 ESTUDIO DE OLEAJE	39
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
7 REFERENCIAS	47
8 ANEXO.....	51

8.1	CORRECCIONES DE MAGNITUDES DE VIENTO	51
8.2	UMBRALES DE OPERACIÓN	55
8.3	RESULTADOS: SERIE DE TIEMPO VIENTO	58
8.4	Resultados proyecciones para el periodo peak	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de forzamiento radiativo.....	5
Figura 2: Matriz de escenarios SSP. RCP que ilustra las simulaciones CMIP. Cada celda indica una combinación de vía de desarrollo económico (SSP) y un clima basado en un forzamiento radiativo 6	6
Figura 3: Esquema de grilla de un GCM	7
Figura 4 Campo de T_M (A.) y H_{m0} (b.) en el puerto de San Antonio.....	9
Figura 5 Cierre de Puerto de San Antonio por eventos de marejadas	9
Figura 6: Rosa de vientos anual para el puerto de San Antonio	10
Figura 7: Instalaciones del Puerto de San Antonio. (1) San Antonio Terminal Internacional, protegido por el molo sur. (2) DP World San Antonio, (3) Puerto Panul, (4) QC Policarpo Toro Y (5) Terquim	12
Figura 8: Embarque de práctico en el puerto de San Antonio.....	13
Figura 9: Metodología para estudio de vientos	16
Figura 10: Intervalo de tiempo base de datos magnitud de viento	19
Figura 11: Esquema de cálculo de cambios en la altura de ola para la proyección del escenario RCP8.5 (2026-2045) respecto al periodo histórico (1985-2004).....	22
Figura 12: Esquema general de efectos del cambio climático en la magnitud del viento para la proyección del escenario SSP5-8.5 (2026-2045) respecto al periodo histórico (1985-2004).....	25
Figura 13: Comparación de la magnitud del viento para el periodo histórico y proyección a mediados de siglo, además de la diferencia entre ambos	26
Figura 14: Comparación de la magnitud del viento para el periodo histórico y proyección a fin de siglo, además de la diferencia entre ambos	26
Figura 15: Ubicación nodos GCM y Puerto	27

Figura 16: Esquema de interpolación de datos de un GCM al puerto de San Antonio	28
Figura 17: Serie de tiempo modelos GCM y reemplazo de gaps en los modelo M3 y M4	30
Figura 18: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en el periodo histórico (1985-2004). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto.....	32
Figura 19: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a mediados de siglo (2026-2045). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto	33
Figura 20: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a fin de siglo (2081-2100). Umbrales definidos por la Capitanía de Puerto	33
Figura 21: Mediana de los Modelos GCM de viento por periodos de tiempo	34
Figura 22: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en el periodo histórico (1985-2004). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99.....	36
Figura 23: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a mediados de siglo (2026-2045). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99	37
Figura 24: Cruce de curvas de excedencia de la magnitud del viento en la proyección a fin de siglo (2081-2100). Umbrales definidos por la ROM 3.1-99.....	37
Figura 25: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo histórico con las condiciones límites de operación	40
Figura 26: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo medio siglo (2026-2045) con las condiciones límites de operación	41
Figura 27: Cruce de curvas de excedencia de la altura de ola para cada modelo en el periodo fin siglo (2026-2045) con las condiciones límites de operación	41
Figura 28: Mediana de los Modelos GCM de altura de ola por periodos de tiempo.....	42
Figura 29: Relación entre la velocidad del viento de cualquier duración (U_t) y la velocidad del viento de 1 hora(U_{3600}).....	52
Figura 30:Relación (RL) entre la velocidad del viento sobre el agua (UW) y la velocidad del viento sobre la tierra (UL)	53
Figura 31: Relación de amplificación (RT) de W_c (velocidad del viento que tiene en cuenta la diferencia de temperatura entre el aire y mar) a W_w (velocidad del viento sobre el agua sin efectos de temperatura).....	54

Figura 32: Serie de tiempo periodo Histórico (1985-2004).....	58
Figura 33: Serie de tiempo para proyección SSP5-8.5 (2026-2045).....	59
Figura 34: Serie de tiempo para proyección SSP5-8.5 fin de siglo (2081-2100).....	60
Figura 35: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en el periodo histórico (1085-2004).....	61
Figura 36: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en la proyección a mediados de siglo (2026-2045).	61
Figura 37: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak del oleaje en la proyección a fin de siglo (2081-2100).....	62
Figura 38: Cruce de curvas de excedencia del periodo peak. Mediana de todos los horizontes de evaluación	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Umbrales Operacionales Puerto de San Antonio	14
Tabla 2: Modelos GCM del CMIP6 seleccionados para el estudio de vientos	24
Tabla 3: Factores de corrección de la magnitud del viento	29
Tabla 4: Umbrales de operacionales para el viento definidos por la Capitanía de Puerto	31
Tabla 5: Umbrales de operacionales para el viento definidos por la ROM 3.1-99.....	31
Tabla 6: Resultados Downtime operacional. Umbral de 5,14 [m/s] definido por Capitanía de Puerto	35
Tabla 7: Resultados Downtime operacional. Umbral de 7,71 [m/s] definido por Capitanía de Puerto	35
Tabla 8: Resultados downtime operacional por viento. Umbrales definidos por la ROM 3.1-99.....	38
Tabla 9: Modelos GCM del CMIP5 seleccionados y <i>hindcast</i> histórico.....	39
Tabla 10: Resultados de downtime operacional por altura de ola. Umbrales establecidos por la Capitanía de Puerto	43

RESUMEN

El Puerto de San Antonio se encuentra totalmente expuesto al viento y oleaje reinante generado en el Océano Pacífico. Las horas de cierre del puerto debido a condiciones meteorológicas adversas han generado pérdidas del orden de millones de dólares tanto para la cadena logística como para la economía del país. En este trabajo se efectúa un análisis de largo plazo, considerando los efectos del cambio climático, en dos variables relevantes que considera la Autoridad Marítima para emitir un cierre de puerto: el viento en la dársena principal del puerto de San Antonio y el oleaje en la zona de embarque de prácticos.

El estudio se basa en el cálculo estadístico del *downtime* operacional a partir de una serie de modelos de circulación general (GCMs) en tres horizontes de evaluación: un periodo histórico (1985-2004) que sirve de base comparación, y dos proyecciones a horizontes a mediados de siglo (2026-2045) y a fin de siglo (2081-2100). El *downtime* operacional se define en este trabajo como el porcentaje de tiempo en que una operación portuaria no puede hacerse debido a condiciones desfavorables de viento u oleaje, y se asume como un estimador de las horas de cierre de puerto emitidos por la Autoridad Marítima.

Para el viento se utilizan 4 GCMs disponibles en el escenario SSP5-8.5 del CMIP6, el cual corresponde a un escenario conservador (esto es, asociado a un cálculo del *downtime* comparativamente alto), donde el desarrollo económico y social se combina con la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles. Para el oleaje se utilizan 6 GCMs asociados al escenario RCP8.5 del CMIP5, cuyo procesamiento fue desarrollado por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica en el marco de varios estudios previos. La selección de una base de datos más antigua para el oleaje se basa en la nula disponibilidad de estos datos en el CMIP6.

En términos metodológicos, el cálculo del *downtime* operacional se basa en el cruce de las curvas de excedencia asociadas a una cierta magnitud para cada variable (magnitud del viento y altura significativa de oleaje) con los umbrales de operación establecidos por la Autoridad Marítima en la Resolución de Operaciones C.P.S.A ORDINARIO N°12.600/91 VRS, que habilita las Instalaciones Portuarias del Puerto de San Antonio en función de las dimensiones y tipo de nave. El cálculo se efectúa tanto para el periodo histórico como para

ambas proyecciones, en forma independiente para el viento y para el oleaje. A modo de comparación, se utilizan también umbrales admisibles de operación disponibles en las recomendaciones de obras marítimas ROM 3.1 (PPEE, 1999), que son bastante más rigurosos -y por tanto generan valores bastante menores en el *downtime*- para el caso de San Antonio.

Los resultados indican que para un umbral de operación de 7,71 [m/s] de la magnitud del viento, el puerto aumentaría el *downtime* a mediados y fin de siglo respecto al periodo histórico, con 24 horas y 42 horas de diferencia respectivamente. Esto solo si se considera como criterio de cierre el viento operacional. La probabilidad de excedencia de este umbral ronda en los 5%.

En cuanto al oleaje operacional en la zona de espera de práctico, la probabilidad de excedencia de la altura significativa tiende a disminuir, obteniendo una disminución *downtime* de 14 horas para mediados de siglo y 85 horas para fin de siglo en comparación al periodo histórico. Sin embargo, estas diferencias se consideran despreciables, pues la probabilidad de tiempo que excede la altura significativa es muy alto (cerca del 71%). Esto significa, aunque se proyecte una disminución del *downtime* por oleaje, todavía existe una alta probabilidad de interrupción en la operatividad del puerto debido a las condiciones de esta variable.

Finalmente, se esbozan (pero no analizan) algunas medidas de adaptación que podrían ser adoptadas para reducir el *downtime* operacional en las operaciones de transferencia de carga y en la zona de embarque de prácticos. Y para el viento es necesario considerar otros criterios para definir el umbral, como los movimientos de la nave.